第 37 卷第 12 期
2017 年 6 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.12
Jun.,2017

DOI: 10.5846/stxb201601270195

王志强,田娜,缪建群,王海伦,王海,黄国勤.基于组合可拓综合分析法的鄱阳湖流域水质富营养化评价.生态学报,2017,37(12):4227-4235.

Wang Z Q,Tian N,Miu J Q,Wang H L,Wang H,Huang G Q.Eutrophication assessment of water quality in poyang lake basin based on comprehensive analysis method of combined extension.Acta Ecologica Sinica,2017,37(12):4227-4235.

基于组合可拓综合分析法的鄱阳湖流域水质富营养化评价

王志强[1,4],田　娜[2],缪建群[3],王海伦[4],王　海[5],黄国勤[1,*]

1 江西农业大学生态科学研究中心,南昌　330045

2 江西财经大学鄱阳湖生态研究院,南昌　330032

3 江西农业大学理学院,南昌　330045

4 南昌职业学院,南昌　330500

5 江西科技学院,南昌　330098

摘要:长期跟踪定位评价湖泊的水质营养化程度,对于实现地区水功能具有重要意义。针对评价方法中指标选取的可行性、单一性、权重赋值的主观随意性以及水质变化的模糊性、随机性、动态性和生物指示性等特点,采用了可拓综合评价法和浮游生物调查与室内测定法相结合,构建了组合可拓综合分析法,一方面利用可拓综合分析法对鄱阳湖流域 5 个代表性观测站点的 10 年的年均(每 2 年)观测数据进行评价;另一方面通过浮游生物指示法对该 5 个站点的水质进行富营养化评价,以生物指示评价法所得等级与可拓综合分析法评定等级吻合的最多次数所对应等级作为组合可拓综合评价法的评价等级。结果表明:(1)自 2006 年以来鄱阳湖流域水体富营养化水平较为平稳,总体呈好转势态。2010 年有 4 个观测点的水体达到富营养化程度,而在 2014 年湖区的蛤蟆石和鄱阳水质略有所改善,达到轻富营养化程度,都昌、康山、星子站点的水体为中营养化,改善幅度较大,水质较好;(2)从湖区的地理区位看,鄱阳湖湖区的南部和西部的水质富营养化程度总体上要好于北部、东部和中部湖区,水质富营养化程度表现为区域的不均匀性。

关键词:可拓综合分析法;浮游生物指示法;鄱阳湖流域;富营养化;综合评价

Eutrophication assessment of water quality in poyang lake basin based on comprehensive analysis method of combined extension

WANG Zhiqiang[1,4],TIAN Na[2],MIU Jianqun[3],WANG Hailun[4],WANG Hai[5],HUANG Guoqin[1,*]

1 *ecological science research center of Jiangxi agricultural university*, *Nanchang* 330045, *China*

2 *Institute of Poyang Lake Eco-economics*, *Jiangxi University of Finance and Economics*, *Nanchang* 330032, *China*

3 *College of Science*, *Jiangxi Agriculture University*, *Nanchang* 330045, *China*

4 *Vocational college of Nanchang*, *Nanchang* 330500, *China*

5 *College of science and technology Jiangxi*, *Nanchang* 330098, *China*

Abstract: Long-term tracking, positioning and evaluating lake eutrophication are key for water areas to achieve their due functions. Given the feasibility, monotony and subjectivity of weight assignment of index selection assignment in the evaluation method and fuzziness, randomness, dynamic and biological indicative of water quality change, this study combines extensive and comprehensive evaluation with investigation and indoor plankton measurements to construct comprehensive analysis method of combined extension. First, annual data from five representative observation stations in the

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAD14B14);江西省教育厅青年基金项目(JJ1412)

收稿日期:2016-01-27;　　**修订日期**:2017-01-03

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hgqjxauhgq@ sina.com

Poyang Lake Basin were collected for five times (regularly once in two years during 10 consecutive years). The data were evaluated by the combined extension method, whereby the water quality eutrophication of the five sites is evaluated through the plankton indicator method. The maximum consistence of combined level obtained by two methods, i.e. biological indicator evaluation method and extension comprehensive analysis method, can be used as assessing grade for the combined method adopted in the study. The results show that: (1) Water eutrophication has been kept in a stable way and taken on positive changes in Poyang Lake since 2006. In 2010, the water of four observation sites reached the extent of eutrophication. However, in 2014, Toad stone and Poyang sites' water was improved to light-extented eutrophication; the water of Duchang, Kangshan, Xingzi reached the medium nutrition with improved water quality; (2) In terms of geographic location, the degree of eutrophication of the southern and western areas is better than that in the northern, eastern and central lake regions on the whole, indicating the heterogeneity of eutrophication across regions.

Key Words: extension comprehensive analysis method; plankton indicator; Poyang Lake Basin; eutrophication; comprehensive assessment

鄱阳湖是中国最大的淡水湖,也是江西的母亲湖,为准确掌握鄱阳湖流域水质情况,利用科学评价方法客观准确评价湖泊水质,是对鄱阳湖实施有针对性、差异化生态维护、修复和保护的前提,也是保障鄱阳湖地区水功能健康可持续发挥的关键。

目前综合评价水质的方法主要有两大类,其一是单项综合方法评价(包括改进式),这类评价方法主要是针对湖泊富营养化评价中的模糊性[1-4]、不确定性[5-6]、不完整性和水质动态变化性[7]等某一方面,通过相应综合评价方法[8],抑或通过改进评价方法中的隶属函数关系[4,9-11]或删减相应的理化(或生物)[12-13]评价指标,抑或对指标权重赋值给予合理改进[14]等技术处理,使得综合评价结果更接近实际值;其二是组合综合方法评价法,这类方法是集几项单个综合评价方法的优点,通过建立一定的函数关系[15-16],通过新方法[17]、新思路来改进指标赋值[18-19],抑或构建新的组合综合评价模型[20],以达到提高组合综合评价的精度。以上两类方法都是针对影响富营养化的某些物理、化学、生物(叶绿素 a)因子给予了综合评价,各评价方法都有自身侧重点及优点和缺点,在湖泊富营养化评价中取得了许多成功。但这些综合评价方法有的只能定性判定但不能定量分析或是定量分析精确不够,有些计算也比较复杂,应用多有不便,并且前期大多数研究多半是基于短期的观测结果而评估的,缺乏长期评估的动态性,对空间差异性动态分析也较少。而可拓综合评价法是建立在可拓集合论的基础上,既能从数量上反映被评价对象本身存在状态的所属程度,又更具特色的从数量上刻画何时为此性态与彼性态的分界,为描述评价对象的动态性带了极大方便,有利于描述被评价对象的模糊性、灰色性,也有利于综合反映水质的绝对情况和相对情况。同时利用浮游生物生物量变化及优势种分布监测评价湖泊水环境(富营养化)具有重要借鉴价值,并且在国内外已有相当长的历史[21-22],浮游植物是水体富营养化等级的重要指示生物[23],浮游植物在不同的湖区和不同营养等级水体中其生物量有较大差异[24]。目前结合可拓综合分析法和湖泊水生生物的优势种群和生物量情况给予组合综合评价湖泊水质富营养化的研究并不多见。

因此,本研究首先采用可拓综合评价法,引入物元理论,科学、客观地、全面地对鄱阳湖水质进行动态综合评价,以期研究鄱阳湖综合水质的动态性和空间差异性;另一方面借助水生生物对湖泊水质富营养化响应指示作用,通过野外调查、查阅统计资料和室内检测相结合的方法,分析了各观测站点不同时期的富营养化程度,以各站点生物指示评价法所得等级与可拓综合分析法评定的等级吻合的最多次数所对应等级作为该组合综合评价法的评价等级。

组合可拓综合分析方法是从生态完整性意义上通过建立了物理、化学和生物因素的多指标参数的质量评价模型,通过引入关联函数,利用关联函数的综合关联度对水质进行评价,以定量的数值表示具体评定结果,并利用生物指示法对可拓综合分析法进行修正,提高了评价精度,能较完整地反映年际间样品的综合质量水

平,避免了指标评价的片面性,该组合综合评价法其概念清晰、计算简便、评价结果可度量性高,从而为鄱阳湖水质评价及未来发展趋势判断提供更加可靠的科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

鄱阳湖流域位于长江中游、江西省北部,地理坐标 28°11′—29°51′N,115°49′—116°49′E,湖区承接赣、抚、信、修、饶五大河来水,本文主要根据鄱阳湖地理形态、水文特征及江西省水利枢纽的工程布置、湖区的营养化差异程度及特征等综合因素,在湖区选定了 5 个具有代表性的水域观测点,分别是鄱阳湖的蛤蟆石(北部湖区)、都昌(中北部湖区)、康山(南部湖区)、鄱阳(东部及河口湖区)、星子(西部湖区)[3,12,25-26]。

1.2　数据来源及处理

本研究可拓综合分析法的原始数据来自于 2006—2014 年江西省环境保护厅、江西省水利厅和鄱阳湖水文局的部分数据,根据富营养化评价指标和标准,经整理得出 125 个样本数据;另外本研究用于浮游生物指示法评价富营养化的数据,来自于本研究团队于 2014 年 5、9 和 11 月,根据《湖泊富营养化调查规范》对 5 个代表性站点进行调查,分别以各观测站点为同心圆,以每递增 500m 为半径向湖心方向分别采样(5 次)并鉴定。浮游植物与浮游动物定性样品的采集分别采用 25 号、13 号浮游生物网在 0.5m(2m)水层呈"∞"字形缓慢捞取,并每次分别将网内浓缩液置于 500mL 塑料水样瓶中,现场分别用 1%体积的鲁哥氏液 5%的福尔马林溶液固定,带回实验室检测分类并对藻类优势种进行鉴定。浮游植物定量样品用 2.5L 有机玻璃采水器采集,在各站点水深约 1m 处采集 1L 水样(水深超过 3m 的采样点在 2m 处采样),现场用 1%体积的鲁哥氏液固定置于广口塑料瓶(1.5L)中,样品带回实验室后静置沉降 48h,沉淀浓缩后计数。浮游动物定量样品则采用 5L 有机玻璃采水器采集 5 次获得,再用 25 号(网孔直径为 64μm)浮游生物网过滤浓缩,最后将网头中的样品现场用 5%的福尔马林溶液固定收集于 500mL 样品瓶中,样品带回实验室后继续静置 48h 沉降、浓缩后计数。

1.3　研究方法

本研究首先是利用可拓综合评价法对鄱阳湖湖区 5 个典型观测站点的水质富营养化进行综合评价,然后利用生物指示法对该 5 个站点的水质进行组合综合评价,以修正可拓综合评价法的评价结果。

1.3.1　可拓综合评价法

利用可拓综合法评价水质,一般需要经历确立经典域、确定节域、确定待评价物元、确定指标的权重、确定待评价事物关于各类别的关联度和确定待评价的类别和级别变量特征值 6 个步骤[27]。

(1)确定经典域

设有 m 个评价类别,$N_1,N_2,\cdots,N_m$,将各评价类别对应的特征值范围用 $[a_{ij},b_{ij}]$ 表示,则同征评价类别 R_0 可表示为:

$$R_0=\begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & \cdots & N_m \\ c_1 & [a_{11},b_{11}] & [a_{12},b_{12}] & \cdots & [a_{1n},b_{1m}] \\ c_2 & [a_{21},b_{21}] & [a_{22},b_{22}] & \cdots & [a_{2m},b_{2m}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_n & [a_{n1},b_{n1}] & [a_{n2},b_{n2}] & \cdots & [a_{nm},b_{nm}] \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,N_j 表示第 j 个评价类别,c_i 表示第 i 个评价指标,$v_{ij}=[a_{ij},b_{ij}]$ 分别为 N_j 关于指标 c_i 所规定的量值范围,即各类别关于对应的评价指标所取的数据的范围——经典域(其中 $i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m$)。

(2)确定节域

$$R_p=(P,C,V_p)=\begin{bmatrix} P & c_1 & [a_{1p},b_{1p}] \\ & c_2 & [a_{2p},b_{2p}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & [a_{np},b_{np}] \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中,P 为评价类别的全体,$[a_{ip},b_{ip}]$为 P 关于 c_i所取得量值范围,即节域。

(3)确定待评价物元

对待评价事物,把监测数据或分析结果用物元表示为:

$$R_d = \begin{bmatrix} P & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中,R_d为待评价物元,v_i为待评价事物对应于 c_i的数值。

(4)确定指标的权重

$$W_i \geqslant 0\ (i=1,2,\cdots n) \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{n} W_i = 1 \tag{5}$$

式中,n 为指标个数,W_i为第 i 个评价指标的权重。

(5)确定关联度

计算距:

$$d(v_i,v_{ij}) = |v_i - 1/2(a_{ij}+b_{ij})| - 1/2(b_{ij}-a_{ij}) \tag{6}$$

$$d(v_i,v_{ip}) = |v_i - 1/2(a_{ip}+ b_{ip})| - 1/2(b_{ip}-a_{ip}) \tag{7}$$

式中,$d(v_i,v_{ij})$、$d(v_i,v_{ip})$分别为点与区间的距。$d(v_i,v_{ij})$表示点 v_i与区间 v_{ij}的距,$d(v_i,v_{ip})$表示点 v_i与区间 v_{ip}的距,$1/2(b_{ij}-a_{ij})$表示区间(a_{ij},b_{ij})的大小,$1/2(b_{ip}-a_{ip})$表示区间(a_{ip},b_{ip})的大小。

计算关联函数:

$$K_j(v_j) = \begin{cases} \dfrac{d(v_i,v_{ij})}{d(v_i,v_{ip}) - d(v_i,v_{ij})} & v_i \notin v_{ij} \\ \dfrac{-d(v_i,v_{ij})}{|v_{ij}|} & v_i \in v_{ij} \end{cases} \tag{8}$$

式中,$K_j(v_j)$为关联函数,待评价事物的指标 c_i关于类别 j 的归属度,$|v_{ij}|$ 为区间$[a_{ij},b_{ij}]$的长度。

计算关联度:

$$K_j(p) = \sum_{i=1}^{n} w_i \times k_j(v_i) \tag{9}$$

式中,$K_j(p)$为在考虑指标重要性程度情况下,待评价事物各指标关于各类别的关联度的组合值。

(6)确定待评价的类别和级别变量特征值

若 $k_{j0}(\mathrm{p}) = \max K_j(p)\ (j=1,2,\cdots,m)$,则测定 p 属于类别 j_0。记:

$$K_j\ (p) = \frac{k_j(p) - \min\limits_{1\leqslant j\leqslant m} k_j(p)}{\max\limits_{1\leqslant j\leqslant m} k_j(p) - \min\limits_{1\leqslant j\leqslant m} k_j(p)} \tag{10}$$

则 p 的级别变量特征值 j^* 为:

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^{m} j \times \overline{k_j(p)}}{\sum_{j=1}^{m} \overline{k_j(p)}} \tag{11}$$

1.3.2 可拓综合分析法研究指标及标准

对于鄱阳湖的评价指标及标准,本文采用了普遍使用[5-6,11-12,17,20]的 5 项指标参数,分别是总磷(TP)、总氮(TN)、化学需氧量(COD)、透明度(SD)和叶绿素 a(Chl a),其营养等级评价标准根据《地表水环境质量标

准》GB3838—2002 分为极贫营养、贫营养、中营养、轻富营养和重富营养[2,27],具体列于表 1。

表 1　鄱阳湖富营养化评价参数及分级标准

Table 1　Eutrophication evaluation parameters and classification standard of Poyang Lake

营养等级 Nutritional level	总磷 TP/(mg/L)	总氮 TN/(mg/L)	高锰酸盐指数 COD/(mg/L)	透明度 SD/m	叶绿素 a Chl a/(μg/L)
极贫营养 Very poor nutrition	(0,0.005]	(0,0.07]	(0,1.40]	(8.25,10]	(0,0.25]
贫营养 Poor nutrition	(0.005,0.019]	(0.07,0.24]	(1.4,2.96]	(2.94,8.25]	(0.25,1.59]
中营养 Moderate nutrition	(0.019,0.065]	(0.24,0.77]	(2.96,6.29]	(1.05,2.94]	(1.59,10]
轻富营养 Mild eutrophication	(0.065,0.413]	(0.77,4.50]	(6.29,19.40]	(0.22,1.05]	(10,158.5]
重富营养 Severe eutrophication	(0.413,1.415]	(4.5,14.64]	(19.4,41.14]	(0.08,0.22]	(158.5,1000]

TP:Total Phosphorus;TN:Total Nitrogen;COD:Chemical Oxygen Demand;SD:Silting Density;Chl a:Chlorophyll a

1.3.3　浮游生物指示法评价及其标准

浮游生物指示富营养化程度的研究前期也较多[21-24],浮游生物指示法评价水质就是利用浮游生物量的多少来反映水质富营养化程度的一种全生物意义上的客观评价。本研究在查阅相关文献的基础上,对浮游生物指示富营养程度的关系做了相关归纳总结(表 2)。在实地考察的基础上,通过对 2014 年 5 个站点的 75 个(每个站点利用同心圆法采样 5 个,每月共采集 25 个样本,5、9 和 11 月共 75 个)样本数据,利用生物指示法,经检测得出各个站点的富营养化情况,结果见表 4。

表 2　浮游生物量与富营养化等级对应关系

Table 2　The relationship between plankton biomass and eutrophication level

浮游生物量[25]/(mg/L) Plankton biomass	浮游植物量[28]/(个/L) Phytoplankton biomass	优势藻种[29]/门 Dominant species of algae species	富营养化等级[2,27] Eutrophication grade[2, 27]
<1.0	1×10^6	金藻、黄藻	极贫营养
1.1—3.4	$(1—9)\times10^6$	黄藻、甲藻	贫营养
3.5—5.5	$(10—40)\times10^6$	甲藻、隐藻、硅藻	中营养
5.5—8.0	$(41—80)\times10^6$	硅藻、绿藻	轻富营养
>8.0	$>81\times10^6$	绿藻、蓝藻	重富营养

2　组合可拓综合评价结果及分析

2.1　可拓综合评价结果及分析

本文采用了 2006、2008、2010、2012 和 2014 年的 5 个主要观测点的 5 年基础观测记录数据,依据表 1 的标准对 125 个样本数据,根据上述可拓综合评价法的步骤(公式 1—11),利用方统中等[30-31]的评价因子的实测质量浓度与各级标准质量浓度之间的关系,确定了总磷 TP、总氮 TN、高锰酸盐指数 COD、透明度 SD、叶绿素 a(Chl a)5 个指标的权重分别为 0.156,0.295,0.297,0.241 和 0.011,利用 Matlab7.0 软件进行计算,结果见表 3。

表 3　鄱阳湖流域 5 年 5 个观测点年均营养等级评价结果

Table 3　Five observation sites average nutrition level evaluation results of Poyang Lake Basin in five years

年份 Year	观测点 Observation sites	极贫营养(1) Very poor nutrition(1)	贫营养(2) Poor nutrition(2)	中营养(3) Moderate nutrition(3)	轻富营养(4) Mild eutrophication(4)	重营养(5) Severe eutrophication(5)	评价结果 Evaluation results
2006	蛤蟆石	−0.26344	−0.65094	−0.80881	−0.87626	1.7366×10^{14} *	重营养
	都昌	−0.39913	−0.4838	−0.37739	−0.34141 *	−0.58087	轻富营养
	康山	−0.7432	−0.38974	−0.49343	−0.57027	Inf *	重营养
	鄱阳	−0.34689	−0.52727	−0.44186	−0.24239 *	−0.55571	轻富营养
	星子	−0.34689	−0.52727	−0.44186	−0.24239 *	−0.55571	轻富营养

续表

年份 Year	观测点 Observation sites	极贫营养(1) Very poor nutrition(1)	贫营养(2) Poor nutrition(2)	中营养(3) Moderate nutrition(3)	轻富营养(4) Mild eutrophication(4)	重营养(5) Severe eutrophication(5)	评价结果 Evaluation results
2008	蛤蟆石	-0.18146	-0.76865	-0.7476	-0.99434	2.8943×10^{13} *	重营养
	都昌	-0.33305	-0.52944	-0.42493	-0.23646 *	-0.57058	轻富营养
	康山	-0.72825	-0.39636	-0.45347	-0.55903	Inf *	重营养
	鄱阳	-0.31713	-0.55024	-0.32988	-0.25513 *	-0.65443	轻富营养
	星子	-1.2321	-0.98069	-1.0271	-1.4547	$1.0688e\times10^{15}$ *	重营养
2010	蛤蟆石	-0.22257	-0.68824	-0.74236	-0.96221	2.8943×10^{13} *	重营养
	都昌	-0.33136	-0.51813	-0.385	-0.26034 *	-0.57819	轻富营养
	康山	-0.75529	-0.51844	-0.40501	-0.54605	Inf *	重营养
	鄱阳	-0.35362	-0.55196	-0.397	-0.31439 *	-0.70632	轻富营养
	星子	-0.8244	-0.56433	-0.59888	-0.7355	Inf *	重营养
2012	蛤蟆石	-0.17889	-0.76444	-0.73921	-0.94224	2.742×10^{13} *	重营养
	都昌	-0.32594	-0.55892	-0.33604	-0.29765 *	-0.61612	轻富营养
	康山	-0.77359	-0.53384	-0.44639	-0.59869	Inf *	重营养
	鄱阳	-0.30762	-0.5266	-0.25391 *	-0.28729	-0.65927	中营养
	星子	-0.90333	-0.89024	-0.65932	-0.64283 *	-0.66283	轻富营养
2014	蛤蟆石	-0.18446	-0.77165	-0.99484	-0.74874 *	-0.97484	轻富营养
	都昌	-0.31692	-0.54941	-0.31235	-0.31959 *	-0.62495	轻富营养
	康山	-0.6744	-0.47225	-0.37162	-0.33588 *	-0.47825	轻富营养
	鄱阳	-0.29645	-0.52183	-0.30843	-0.2743 *	-0.62481	轻富营养
	星子	-0.77946	-0.56694	-0.52089 *	-0.56577	-0.70134	中营养

Inf 为计算结果无穷大,带“ * ”的为每个评价区域水质指标与营养等级关联度最大的值

根据表 3 及富营养化等级划分标准,可将各观测站点的年际富营养化变化的结果可表示为如下图 1。

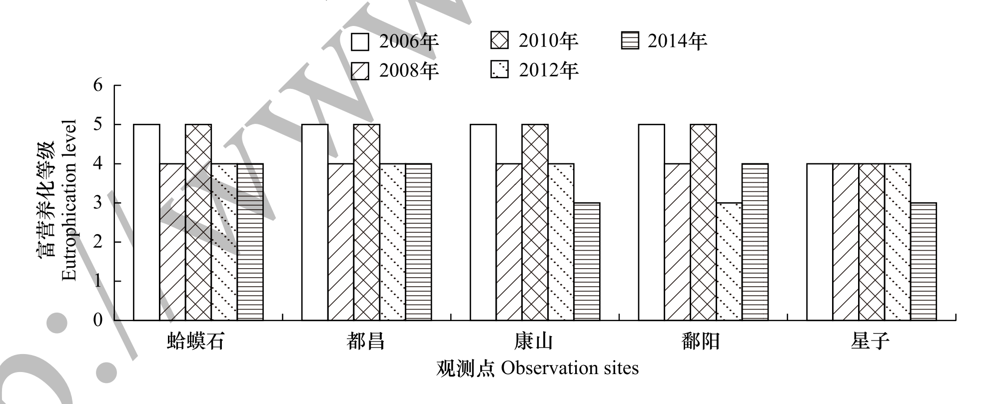


图 1 鄱阳湖流域 5 个主要观测点不同年份水体富营养化

Fig.1 Five main observation points' eutrophication level change trend in five years in Poyang Lake Basin

从图 1 中可以看出:年间(每隔 2a)5 个主要观测点的水体富营养化程度相对比较稳定,但是水质变化的幅度较大。在 2010 年时,有 4 个观测点的水体达到富营养化的程度,随后在 2014 年,蛤蟆石、都昌、鄱阳湖区的水质有所改善,达到轻富营养化程度,但星子、康山站点的水质为中营养化,变化较大,水质较好,观测站点的水质呈总体好转趋势;从湖区的地理区位看,鄱阳湖湖区的南部和西部的水质富营养化程度总体上要好于北部、东部和中部湖区,水质富营养化程度表现为区域的不均匀性。

2.2 生物指示评价法结果及分析

据表 2 的评定指标和标准,对鄱阳湖 5 个典型站点的 75 个样本进行检测,检测结果如表 4,其中浮游生物量和浮游植物量都是给出了各站点 2014 年 5 月(丰水期)、9 月(平水期)和 11 月(沽水期)的测定范围值,在

每个站点 5 个样品的单次检测中,以富营养化等级相同次数最多的等级作为生物指示法评价结果,结果显示:蛤蟆石和鄱阳站点的水质达到轻富营养化程度,康山、都昌和星子站点的水质为中营养化程度,水质较好。

表 4　2014 年各观测站点的生物指示法评价结果

Table 4　The evaluation results of biological indicator method in 2014 year

观测站点 Observation sites	月份 Month	浮游生物量范围 Plankton biomass range/(mg/L)	浮游植物量范围 Phytoplankton biomass range/(个/L)	优势种 Dominant species/门	营养化等级相同次数 The same number times of trophic level	次数最多所对应等级 The corresponding level of maximum times
蛤蟆石	5	6.5—8.0	45.1—75.2	硅藻、绿藻	5	轻富营养
	9	6.0—7.0	42.2—73.1		5	轻富营养
	11	5.4—6.8	40.2—68.8		4	轻富营养
都昌	5	4.1—5.2	33.6—40.0	甲藻、裸藻、隐藻	5	中营养
	9	3.7—4.8	30.6—38.9		5	中营养
	11	3.3—4.7	27.5—36.2		3	中营养
康山	5	4.3—5.5	33.6—40.0	甲藻、裸藻、隐藻	5	中营养
	9	4.1—5.2	30.6—38.1		5	中营养
	11	3.7—5.0	28.5—36.2		5	中营养
鄱阳	5	7.3—8.0	45.1—75.2	硅藻、绿藻	5	轻富营养
	9	5.3—7.2	38.3—73.1		4	轻富营养
	11	5.1—6.6	35.2—68.8		4	轻富营养
星子	5	4.0—5.3	33.6—39.6	甲藻、裸藻、隐藻	5	中营养
	9	3.6—5.0	28.3—35.4		5	中营养
	11	3.0—4.3	9.5—32.3		3	中营养

2.3　组合可拓综合评价结果及分析

从表 5 中可以看出,可拓综合分析法所得评价结果与前人研究结果[15,17-18,21-22]吻合度较好,其中与主成分法、模糊分析法所得 2006 年结果完全一致的站点有康山,水质达到重富营养;与主成分法、模糊分析法和灰色聚类法所得 2006 年和 2008 年结果完全一致站点有鄱阳,水质达到轻富营养;与模糊分析法和灰色聚类法所得 2008 年结果完全一致站点有星子,水质达到重富营养,因此可拓综合分析法所得结果可靠、合理。而从浮游生物对水质响应的角度,根据生物指示法评价结果对可拓综合分析结果进行修正后的组合可拓综合分析法所得结果与可拓综合分析法所得结果相比,发现 2014 年各站点的评价结果,仅都昌站有所差异,其他各站点两评价方法的评价结果一致。同时结果还显示 2014 年的组合可拓综合分析法的评价结果与 2015 年江西省环境质量公报所公布的结果吻合性更好,湖区近 80.9%的水域水质为中营养化,湖区轻度污染[32],因此组合可拓综合分析法所得结果更为科学合理。

3　讨论

综合评价水质的关键在于指标的选择及指标值的确定,也是备受争议之处。陈藜藜等将水质评价等级分为贫营养、贫中营养、中营养、中富营养、重营养和重富营养 6 个等级,并给出了相应的标准值范围[33],崔扬等通过对新安江水库(千岛湖)的实测数据的回归分析,认为有色可溶性有机物(CDOM)、浊度(TURB)等指标也可作为评价水体富营养化的重要指标[34]。单利平等为解决水质富营养化评价指标间的信息重叠和评价结果的不确定性,选取了溶解氧、氨氮、总氮、总磷、化学需氧量(COD 和 COD_{Mn})、五日生化需氧量和氟离子含量及 PH 共 9 个指标,在进行了主成分分析后,利用模糊综合评价法进行了综合评价[35]。本研究在参考大量文献[3,12,25-26]和结合实测数据(浮游生物量)的基础上,首先利用 MATLAB 软件原理及实现方法[27],以《湖泊富

营养化调查规范》和方统中等人[30]的研究为依据,确立了总磷 TP、总氮 TN、高锰酸盐指数 COD、透明度 SD、叶绿素 a(Chl a)5 个指标,对评价等级分为极贫营养、贫营养、中营养、轻富营养和重营养 5 个等级;其次从浮游生物对水质质量响应的角度,引入浮游生物指标,利用生物指示法对可拓综合分析结果进行浮游生物响应意义上的修正,以提高评价的精度。因此,仅利用可拓综合分析法对 5 项指标进行综合分析水质不够全面,故本文采用生物指示法对可拓综合分析结果进行修正,以提高评价精度。

表 5 组合可拓综合评价法与其它综合分析法的对比结果

Table 5 Comparison results of combined extension comprehensive evaluation method and other comprehensive analysis

年份 Year	观测站点 Observation sites	可拓综合法 Extension comprehensive method	组合可拓综合分析法 Combined extension comprehensive method	主成分法[22] Principal component method[22]	模糊评价法[17-18] Fuzzy evaluation method[17-18]	灰色聚类法[21] Grey clustering method[21]
2006	康山	重营养	—	V	V	IV
	鄱阳	轻富营养	—	IV	IV	IV
	星子	轻富营养	—	IV	V	IV
2008	康山	重营养	—	V	IV	V
	鄱阳	轻富营养	—	IV	IV	IV
	星子	重营养	—	IV	V	V
2014	蛤蟆石	轻富营养	轻富营养	—	—	—
	都昌	轻富营养	中营养	—	—	—
	康山	中营养	中营养	—	—	—
	鄱阳	轻富营养	轻富营养	—	—	—
	星子	中营养	中营养	—	—	—

IV:水质评定结果为四级,其等级与轻富营养相当;V:水质评定结果为五级,其等级与重营养化相当;—代表由于数据缺失而未评价

影响水质评价精度除指标和标准的确定外,评价方法和指标权重的确定也非常关键。诸多学者针对水质不同侧重点应用了不同评价方法,例如针对水质指标标准界限的模糊性,可采取模糊数学评价法进行评价[1-4];对于数据样本小、不确定性、动态性等特点,可采用灰色聚类法进行评价[5-6]。同时为客观赋值指标权重,众学者所采用方法各异。有通过引入熵权理论对指标权重赋值,以提高评价精度。如熵权集对分析模型[17],也有学者[18-19]组合 7 种方法的评价结果,以方差大小加权或真值次数加权法改进了组合评价方法,并对国内 30 个湖泊的水质进行了组合评价,提高了其评价精度。本文针对湖泊水质变化的模糊性、动态性和生物指示性,在采用可拓综合分析法的基础上,通过生物指示法评价结果,以各站点生物指示评价法所得等级与可拓综合分析法评定的等级吻合的最多次数所对应等级作为该组合综合评价法的评价等级,对可拓综合分析法的指标权重间接地给予修正,提高了该组合综合分析法的评价精度,但该法提高评级精度的幅度还有待于进一步量化研究。

水质富营养化的动态变化与区域性差异与诸多因素有关。本研究结果表明,鄱阳湖水质虽然年际间较为稳定,但从生物指示法评价结果上看,随降水量的变化其年内水质具有较大的波动性,1 年内水质优劣排序依次是丰水期>平水期>枯水期。通过对比鄱阳湖观测站点的历年数据时发现,站点所在区域枯水期水质富营养化程度均比丰水期和平水期严重,总体上看枯水期水质均比丰水期和平水期差[3,12-13]。本研究对每隔 2a 鄱阳湖水质进行了评价,一方面是为了观察水质的长期动态变化,另一方面是为了对比各站点年际间(每 2a)的变化特征。但如果能将评价期划分为丰水期、平水期和枯水期,其评价结果可能更精确。另外本研究一方面由于数据收集的困难也仅对 5 个典型代表性站点进行了评价,站点不全。另一方面是出于考虑湖区特点、水文特征、水利工程对水质的影响、地区富营养化差异及前人[3,12,25-26]研究的成果,故本研究所选站点的水质评价情况也基本上能代表湖区水质情况,研究结果具有一定的代表性,但不够全面。从整体上看,鄱阳湖湖区的南部和西部的水质富营养化程度总体上要好于北部、东部和中部,水质富营养化程度表现为区域的差异性。这可能是污染物汇聚量、沉积及汇聚和扩散方式差异而导致湖口(水口)、码头区域与河区的水质也存在一定

的差异,前者水质往往劣于河区[25]。因此还有待于进一步从更多站点的不同时期(丰水期、平水期、枯水期)给予具体综合分析评价,以便科学地掌握年内水质变化的动态性。

4　结论

本研究利用组合可拓综合分析方法对鄱阳湖流域水质进行了科学评价,认为鄱阳湖流域自 2006 年以来水质变化较为平稳,总体呈好转势态。2010 年有 4 个观测点的水体达到富营养化程度,但在 2014 年湖区的蛤蟆石和鄱阳水质略有所改善,达到轻富营养化程度,都昌、康山、星子站点的水质为中营养化,改善幅度较大,水质较好。但鄱阳湖湖区的南部和西部的水质富营养化程度总体上要好于北部、东部和南部湖区,水质富营养化程度表现为区域的不均匀性。

参考文献(References):

[1] 王焕松,雷坤,李子成,邓义祥,秦延文.辽东湾海域水体富营养化的模糊综合评价.环境科学研究,2010,23(4):413-419.
[2] 李梅,王妲,熊丽黎.模糊数学方法在鄱阳湖水质评价中的应用.江西水利科技,2015,41(3):160-164.
[3] 莫明浩,方少文,宋月君,涂安国.鄱阳湖湖区三站点水质评价及其变化特征研究.水资源与水工程学报,2012,23(4):90-94.
[4] 朱引弟,陈星,孟祥永.基于改进模糊综合评价法的太湖水质评价.水电能源科学,2013,31(9):42-44,247-247.
[5] 王旭晨,王丽卿,彭自然.灰色聚类法评价淀山湖水质状况.上海水产大学学报,2006,15(4):497-502.
[6] 许文杰,陈为国.应用灰色聚类法评价湖泊水体富营养化.山东建筑大学学报,2007,22(1):49-51,56-56.
[7] 黄少峰,刘威,王旭涛,黄迎艳.星云湖富营养化进程的神经网络模拟及污染控制对策.华南师范大学学报:自然科学版,2013,45(5):93-97.
[8] Liu S,Zhu J P,Jiang H H.Comparison of several methods of environment quality evaluation using complex indices.Environmental Monitoring in China,1999,15(5):33-37.
[9] 谢宏斌.南湖富营养化的人工神经网络评价.广西科学院学报,1999,15(1):29-32.
[10] 臧蕾,李祚泳,汪嘉杨.基于概率神经网络的指标规范值的水质评价模型.环境工程,2014,32(2):118-122.
[11] 胡明星,郭达志.湖泊水质富营养化评价的模糊神经网络方法.环境科学研究,1998,11(4):40-42.
[12] 淦峰,林联盛,孙国泉,刘木生,郭秋忠,蔡海生.鄱阳湖(西北水域)水环境现状及其评价.江西科学,2011,29(3):415-420.
[13] 毛玉婷,周晓宇,王毛兰.枯水期鄱阳湖水体富营养化状态评价.南昌大学学报:理科版,2014,38(6):596-599.
[14] 庞振凌,常红军,李玉英,张乃群,杜瑞卿,胡兰群.层次分析法对南水北调中线水源区的水质评价.生态学报,2008, 28(4):1810-1819.
[15] 智国铮,陈耀宁,袁兴中,曾光明,祝慧娜,黄华军,梁婕,江洪炜.基于延拓盲数的洞庭湖湖泊综合营养状态评价模型.中国环境科学,2013,33(11):2095-2101.
[16] 尹星,李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红.基于延拓盲数的湖库水体富营养化评价模型.环境科学学报,2014,34(4):1045-1053.
[17] 谢平,陈海健,唐涛,李彬彬,雷旭,张波.湖泊富营养化组合评价的真值次数加权法.环境科学学报,2015,35(9):2910-2915.
[18] Liu Y,Liu Z C,Gao J,Dai J D,Han J,Wang Y,Xie J M,Yan Y S.Selective adsorption behavior of Pb(Ⅱ) by mesoporous silica SBA-15-supported Pb (Ⅱ) -imprinted polymer based on surface molecularly imprinting technique.Journal of Hazardous Materials,2011,186(1):197-205.
[19] 谢平,陈海健,李彬彬,雷旭,张波.湖泊富营养化组合评价的方差大小加权法.中国科学:技术科学,2015,45(12):1321-1328.
[20] 王晋,王琳,展威,周玲玲,孙鹏.TPLP 模型:一种湖库富营养化评价模型的原理与应用.中国人口·资源与环境,2015,25(S1):180-183.
[21] 王新华,纪炳纯,罗阳,张士禄,王少明,张宇.引滦工程上游浮游动物及其水质评价.城市环境与城市生态,2003,16(6):243-245.
[22] 姜忠峰,李畅游,张生.呼伦湖浮游动物调查与水体富营养化评价.干旱区资源与环境,2014,28(1):158-162.
[23] 苏玉,文航,王东伟,孙金华,黄艺.太湖武进港区域浮游植物群落特征及其主要水质污染影响因子分析.环境科学,2011,32(7):1945-1951.
[24] 王艺兵,侯泽英,叶碧碧,曹晶,储昭升,曾清如.鄱阳湖浮游植物时空变化特征及影响因素分析.环境科学学报,2015,35(5):1310-1317.
[25] 刘倩纯,余潮,张杰,陈熙,葛刚,吴兰.鄱阳湖水体水质变化特征分析.农业环境科学学报,2013,32(6):1232-1237.
[26] 周文斌,万金保,姜加虎.鄱阳湖江湖水位变化对其生态系统影响.北京:科学出版社,2011:64-65.
[27] 何逢标.综合评价方法 MATLAB 实现.北京:中国社会科学出版社,2010:269-285.
[28] 钟诗群,李秀丽,吴洪华,张锦标,余爱芹.广西石祥河水库水体富营养化评价及分析.生态科学,2014,33(2):366-372.
[29] 金相灿,刘鸿亮.中国湖泊富营养化.北京:中国环境科学出版社,1990:77-121.
[30] 方统中,杜耘,蔡述明,陈斌,江炎生.模糊数学在洪湖富营养化评价中的应用.浙江林学院学报,2008,25(4):517-521.
[31] 刘倩纯,胡维,葛刚,熊勇,赖劲虎,吴兰.鄱阳湖枯水期水体营养浓度及重金属含量分布研究.长江流域资源与环境, 2012,21(10):1230-1235.
[32] 2014年江西省环境质量公报.[DB/OL].(2015-06-01).http://www.Jxepb.gov.cn/sjzx/hjzkgb/2015/be9b658d8e08422cb5d0c5ed7afac33c.htm.
[33] 陈藜藜,金腊华.湖库富营养化的改进型模糊综合评价方法研究.中国环境科学,2014,34(12):3223-3229.
[34] 崔扬,朱广伟,张运林,朱梦圆,许海,施坤,李未,秦伯强.湖库富营养化指标的高频监测方法研究.环境科学学报, 2014,34(5):1178-1185.
[35] 单利平,田卫,魏强.模糊综合评判方法在查干湖水质评价中的应用.湿地科学,2015,13(1):124-128.